

# Numerical Simulation of Impurity Transport in Tokamak Edge Plasmas

February 2018

Shohei YAMOTO

報告番号	Ⓐ 乙 第	号	氏 名	矢本 昌平
主 論 文 題 名 : Numerical Simulation of Impurity Transport in Tokamak Edge Plasmas (トカマク周辺プラズマにおける不純物輸送の数値シミュレーション)				
(内容の要旨) 現在、核融合発電実現に向けて、世界7極の協力の下、国際熱核融合実験炉 ITER がフランスで建設中である。ITER およびそれに続く原型炉では、タングステン(W)がダイバータ板および第一壁候補材になっている。炉心プラズマの性能は、炉壁から発生する不純物によって大きく影響を受ける。W の炉心プラズマ侵入は、放射冷却による炉心温度低下や燃料希釈を招き、核融合炉の連続運転を妨げる。ITER の運転においては、運転中に許容できる W のコア侵入量は炉心プラズマ密度比 $1.0 \times 10^{-5}$ 以下とごく少量である。したがって、核融合発電の実現のためには、プラズマ中の W 不純物輸送過程の理解、および輸送制御手法の確立が必要不可欠である。そこで、本研究では、核融合炉設計に使用できる信頼性の高い不純物輸送コード開発を目的とし、モンテカルロ重金属不純物輸送コード IMPGYRO の開発・モデル高度化を行った。さらに、高度化された IMPGYRO を用い、ITER の周辺プラズマにおける W 輸送過程の予測計算を行った。 第1章は序論であり、研究対象であるトカマク型核融合炉、W 不純物のコア侵入のプラズマ性能への影響およびその輸送過程について説明し、研究目的を明確にしている。 第2章は、本研究にて使用した多粒子種プラズマ輸送コード SOLPS-ITER と、W 不純物輸送コード IMPGYRO の物理モデルについて述べている。 第3章は、磁力線平行方向の W 不純物輸送過程における、熱力・摩擦力の効果について検討している。ダイバータ板から発生した W 不純物は、熱力・摩擦力のバランスにより輸送方向が決定され、周辺プラズマ領域上部に滞留し、コアへと侵入する可能性があることを明らかにした。 第4章では、第3章にて確認されていたコアプラズマへの W 侵入過程について詳細な解析を行った。検証にあたり、IMPGYRO コードに SOL/ダイバータの運動論的シミュレーションでは世界で初めて磁力線垂直方向の新古典モデルを導入し、コードの高度化を行った。以上のモデル高度化を行った IMPGYRO と、従来用いられてきた異常拡散のみで径方向輸送を扱ってきたモデルとを比較し、IMPGYRO コードでは大きなコア向きの W 流束が確認され、新古典輸送によるコアへの W 侵入の可能性を初めて示唆した。 第5章では、ITER 運転における W 不純物輸送の予測計算を行った。SOLPS-ITER にて計算した外側ダイバータ板にて高リサイクリング状態、部分デタッチの2つのプラズマパラメータを基に、IMPGYRO による不純物輸送計算を実施した。いずれの場合でも、ダイバータ板外縁部からの W 発生が確認されたが、ダイバータ板へと押し戻され、コアへの侵入には寄与しないことが分かった。一方、高リサイクリング状態の場合は、ストライク点近傍から発生した W 不純物が、コアに向かい輸送される結果が得られた。本結果より、ITER 運転時における W 不純物輸送に関する重要な知見を得ることができた。 第6章は結論であり、本研究の成果をまとめている。				

# Thesis Abstract

No. \_\_\_\_\_

Registration Number	<input checked="" type="checkbox"/> "KOU" <input type="checkbox"/> "OTSU" No. _____ <small>*Office use only</small>	Name	Shohei YAMOTO
Thesis Title Numerical Simulation of Impurity Transport in Tokamak Edge Plasmas			
<p>Thesis Summary</p> <p>In order to realize the power generation by the nuclear fusion, the ITER is being constructed in France under the international collaboration project of seven parties. For the ITER and the subsequent demo reactor, tungsten (W) is considered as the most feasible material for plasma-facing components (PFCs). The performance of the fusion core plasma is influenced by the impurities coming out from the PFCs. The concentration of W impurities in the core plasma causes radiation cooling of the core plasma and the dilution of the plasma density. The ITER expects its maximum tolerance of a concentration of W <math>1.0 \times 10^{-5}</math> as a ratio between the W impurity density and the core plasma density. Therefore, it is indispensable to understand W impurity transport process in the plasma and to establish a method to control its transport. In this thesis, aiming to develop the reliable impurity transport code which can be used for designing fusion reactors, Monte-Carlo heavy metal impurity transport code IMPGYRO has been improved and applied to the predictive W transport simulation of the ITER.</p> <p>In Chapter 1, the introduction of this study is given. The basic concept of tokamak fusion reactors, the influence of the core concentration of the W impurities on the core plasma performance, and transport process of the W impurity are explained.</p> <p>In Chapter 2, the physical model of the multi-species plasma transport code SOLPS-ITER and the W impurity transport code IMPGYRO, which are used in this study, is explained.</p> <p>In Chapter 3, the W impurity transport process parallel to the magnetic field line is discussed by focusing on the effects of the thermal force and the friction force. The results show that the transport direction of the W impurities is mainly determined by the balance between the friction force and the thermal force. Under such a process, the W impurities have been transported towards upstream region of the edge plasma and then penetrate into the core plasma.</p> <p>In Chapter 4, the detailed analysis of the W penetration process into the core discussed in Chapter 3 has been performed. The model improvement of the IMPGYRO code has been achieved by implementing the cross-field neoclassical transport model into the IMPGYRO code. The perpendicular flux of W has been examined by comparing a conventional guiding center model and the improved IMPGYRO. The perpendicular flux of W from IMPGYRO tend to be larger than those from the guiding center model. The result suggests that the core penetration of W possibly takes place by the neoclassical transport.</p> <p>In Chapter 5, the predictive simulation of the W impurity transport in the ITER operation scenario has been performed. The W impurity transport has been compared between different typical ITER operation scenarios, (A) the high recycling state, and (B) the partially detached state in the outer divertor plate, calculated by the SOLPS-ITER code. In both cases, W impurities are sputtered from the baffle region. However, none of the sputtered W impurities manage to penetrate into the core. On the other hand, in the high recycling state, the W impurities sputtered from the region near the strike point have been transported to the upstream towards the core region. The important information of W impurity transport for the ITER plasma operations has been achieved.</p> <p>In Chapter 6, the achievements obtained by this study are summarized.</p>			